

科学の適用限界を伝えるリテラシー教育¹

東北大理 本堂 毅

東北大学では2004年、理科実験科目「自然科学総合実験」を開講した。理科系は約1,800名、2007年度開講した文科系は約50～60名が毎年受講している。「弦の振動と音楽：文化の普遍性と多様性」は、その1テーマであり、旧来の理科実験とは質的に異なる企画意図からテーマ開発した。旧来の理科は、科学の普遍性を教え込むことに、その狙いの殆どがあったと思われるが、本テーマでは、普遍性と同時に科学の適用限界を伝えることを目標にした。科学の普遍性への誤った理解が、社会の中で科学全般に対する誤解、社会的判断の誤り、理科離れに繋がっているとの認識からである。学問の適用限界を正しく知することは、その学問体系自体を正確に把握することに他ならず、社会との関連以前に、科学の本質を知るために不可欠であるとの認識にも基づく。むしろ、理科を専門としない文科系学生の理科教育では、断片的知識より、科学的方法論の把握こそが目標とされるべきであろう。実験では、学生自身が科学の普遍性と文化の多様性の関連、適用限界を、自ら「発見」できるよう教材開発を行った。実験の詳細は、出版されたテキスト[1]に譲り、本稿ではテーマ開発の背景について記してみたい。

1. 旧来の理科教育が生み出す科学観

理科離れが指摘されて久しい。科学技術を通じた経済活動衰退への危惧もあれば、学問を担うべき人材減少への危惧もあろう。それゆえ理科教育の充実を叫ぶ声は多いが、なぜ専門家以外にも理科教育が必要か、基本に立ち返った議論に触れることは、残念ながら多くない。

理科教育のあり方を考えるには、現状の理科教育がどのような「科学観」を社会に育んできたかを調べればよいだろう。社会の「科学観」とは、過去数十年に渡る理科教育の反映に他ならない。

「科学観」というと、抽象的で、現実との関係が希薄に思われがちである[2]。そこで、社会との接点が明らかな司法での具体例をみることで、科学観の重要性を検証しよう。仮に裁判官の持つ科学観が妥当性を欠くなら、科学的事実認定を誤ることにより、冤罪等を生み出し、社会に混乱をもたらす。また、弁護士や検事の科学観が妥当性を欠くならば、法廷で合理性を欠いた不毛な議論が続くことになる[3]。

¹本稿は、2008年8月に日本物理学会キャリア支援センター主催により開催された「教育分野キャリアパス研究会」の報告書を改変したものである。

a. 最高裁ルンバール判決(1975)

この判決で、最高裁は「自然科学は一点の疑義もない証明の上に成り立つ」という科学観を披露している。科学という営みの本質を知る自然科学者なら、椅子から転げ落ちるような科学観である。けれど、司法の現場（たとえば法廷）において、このような科学観が科学・技術の関わる議論の基本になっていることは、科学的争点を持つ裁判の調書等から明らかである[3].

科学は、自然現象を実験や観測を通して少しずつ解明し、帰納法によって法則を推論していく営みである。したがって、常に未解明な部分、適用限界が存在するし、これを率直に記すことが求められる。しかし、倒錯した科学観は、未解明な部分を正直に記す健全な科学を「著者自身も認めざるをえない程の欠陥」研究と解釈させてしまう[3]。温室効果ガスによる地球温暖化議論の混乱などでは、科学界の中にも、同様な科学観の存在が見え隠れする²。

b. 科学的事実(evidence)と価値判断の混同

科学の記述対象である自然法則は価値中立である³。それゆえに、紛争当事者間における議論の共通前提として、法廷で科学的知見は重用される（科学の公共性）。しかし、科学的知見（evidence）と、多様な価値観を反映した社会規範に基づく社会的判断が、司法では明確に区別されていない。むしろ、科学的事実が社会的判断を直接決定するかのような認識が広く浸透している。だから、価値判断（倫理的判断）基準が異なることで争いが生じている場合、議論は混乱する[3]。科学で決められない価値判断（倫理

² 2008年9月22日の毎日新聞「ひと」欄には、次の記事が掲載された

「地球温暖化の大きな原因が本当に二酸化炭素（CO₂）なのか、もう少し冷静に議論する必要がある」

国連の「気候変動に関する政府間パネル」（IPCC）は、20世紀後半以降の気温上昇の原因を人類の出すCO₂としたが、それに疑問を投げかける。

この記事は、IPCCが地球温暖化の大きな原因を二酸化炭素であると断定したことを前提に書かれている。科学的営みの本質から明らかなように、温暖化の大きな原因が二酸化炭素であると断定することは科学的に不可能であり、事実、IPCCは断定していない。この記事を書いた記者は、IPCCの報告書を読まずに、誤った思い込みを前提として記事を書いたことが、記者本人への取材によって判明した。研究者にも同様に、IPCCがCO₂を温暖化の大きな原因として断定したとする、誤った前提から「懐疑論」を展開する者が少なくない。尚、上に挙げた毎日新聞の「誤報」は、2009年9月1日現在、未だ訂正されておらず、社会が科学を誤解する原因となり続けている。

³ 科学という行為（営み）と、自然が従っている法則自体を区別されたい。

的判断)を科学に求めても、話はすれ違うからである。科学的事実は、社会的判断(価値判断)の際、役に立つ参考事項であるが、科学的事実自体が、社会的判断(価値判断)を決めるのではない⁴[4]。価値判断からの独立性ゆえに科学が公共的価値を持つことが、多くの場合認識されていないのである。

c. 科学の適用限界への誤解と、その帰結

社会が科学の適用限界を誤って認識・適用したとき、どのような悲劇が生まれるのだろうか。科学技術社会論を専門とする杉山滋郎氏は次のように記す。

(藤垣裕子編『科学技術社会論の技法』 第1章「水俣病における行政と科学者とメディアの相互作用」東京大学出版会 2005年 より)

「科学では完璧に説明がつくことはまずないのだ」という点は、科学教育では教えられてこなかった。科学に対し「欠陥品」のようなイメージを与えらるゝとして、科学の「完全性」が強調されてきたのである。しかしながらこうした「科学のモデル」は、疑似科学に対抗するには有効である(あった)が、「科学技術の社会問題」に対処するには不適切だと思われる。科学の完全性を強調することの逆の面(副作用)が強く出てしまうのである。

...

水俣病の場合、「患者さんたちがお気の毒だとは思いますが、科学的に原因が完全に解明されていない以上、いかんともしがたい」という言い方に、人びとは結局のところ「納得」していたのである。レトリック(弁論術)の観点から「公衆の科学理解」を分析する近年の研究(Gross, A.G., 1994, *The role of rhetoric in the public understanding of science, Public Understanding of Science*, 3, 3-23 など)も、この点に関して多くを示唆するように思われる。

このように、誤った「科学観」は社会を混乱に陥れる。しかし、そのような科学観を生んだのは、紛れもなく旧来の理科教育である。ヨーロッパと異なり[6]、日本の理科

⁴ 医療における診断と治療の差異、インフォームド・コンセント論からも多くが学べる。「治療方針はお任せします」という患者は、時に医者困らせる[5]。

教育は、科学に出来ることばかりで、科学の生い立ち、仕組み、適用限界を正直に伝えてこなかった。理論物理の営みからも明らかなように、人は適用限界が明らかではないものを、正しく概念把握できない。だから、科学の正しい姿が市民に理解されず、誤った科学観を生み、社会全体に混乱を起こす⁵。理科離れが進むのも必然であろう。尚、ここで議論された問題点は、科学技術社会論ばかりでなく、フラインマンも著書「科学は不確かだ」（岩波書店、2007）で明快に記しているように、Weinbergをはじめ、多くの優れた物理学者が指摘している。近年では、OECDのPISA学力調査（内村氏の講演を参照）の中で、科学の適用限界が、義務教育終了時に理解しておくべき不可欠な「科学リテラシー」と捉えられていることから、世界の中での日本の理科教育の根本的欠陥が見て取れる⁶。

2. 実験テーマの選択

上記の背景から、本課題では「音楽」をテーマとして取り上げた。音楽には、場所や時代を超えた文化の普遍性と、場所や時代で異なる文化の多様性がバランスよく含まれている。音楽文化の普遍性が自然法則の普遍性に根拠を持つことも分かりやすい。

《普遍性に関する問い》

Q2-1. どうして音階は飛び飛び？

Q2-2. なぜ世界中の音楽は「五線譜」にのるの？

Q2-3. なぜ音楽は世界共通語なの？

《多様性に関する問い》

Q2-4. 世界の音楽（日本、アフリカ、ヨーロッパ…）はなにか違う…。なぜ？

3. 普遍性から多様性へ：音階の選択

授業は学生実験として設計され、学生たちにはクラシックギターが与えられる。実験

⁵ 理科教育の結果、むしろ誤った科学観を広めているという意味で、「教育汚染」と言ってもよいだろう。「固い科学観」（「科学コミュニケーション論」藤垣裕子・廣野喜幸編，東京大学出版会，2008）を広めていると言う点で、いわゆる「ニセ科学批判」にも同様の問題が見える。

⁶ PISA 2006: OECD, Programme for International Student Assessment 2006, Student performance in an international comparison. 例えば、ドイツ・ライプニッツ研究所ホームページ上の資料（http://pisa.ipn.uni-kiel.de/pisa2006/PISA-2006_Broschuere_eng.pdf）の7ページ，“catching the killer”を参照。

の前半では、音楽（文化）の普遍性を生み出す自然法則の普遍性を学ぶ。弦の振動と倍音の関係（フーリエ解析）を、倍音奏法（ハーモニックス奏法）で直感的に確かめ、Q2-1～Q2-3の疑問に関わる科学的事実(evidence)を得ることが出来る。

後半は、音楽の多様性と科学の関係を学ぶ。ここでは、現代の代表的音階を2つ取り上げる。倍音系列の周波数比から自然発生し、世界中で古くから用いられている自然音階（純正律）と、バッハの頃に数学理論を用いて作られた人工音階（平均律）である。

Q3-1. 人工音階（平均律）はなぜ生まれた？

Q3-2. 平均律は自然音階より「優れている」？ 優劣を競える？

この2つの疑問から、学生たちは科学的事実(evidence)と価値判断の関係を学ぶのである。実験や理論計算を通して、学生たちは2つの音階、すなわち、純正律と平均律それぞれの長所と短所を知ることが出来る。一方、実際に音楽を演奏する際には、1つの音階を「選択」せねばならない。そこで学生たちは、科学的事実(evidence)と価値判断の関係に気づき、科学の適用限界を知るのである。

この実験は科学の適用限界と同時に、自然法則を解明する科学という営みが、文化の多様性理解にもつながることを教えてくれる。科学的解析は、平均律と純正律それぞれの特徴（長所、短所）を明らかにするから、それにより、平均律を導入したヨーロッパの人たちが、当時、どのような音楽の特性（音楽表現）に、より大きい価値を見出していたかを推論できる。文化の多様性の背景に民族固有の価値基準の多様性を見るのである(Q2-4)。学生たちは、科学の普遍性を知ることによって文化の多様性を知りうることに気づくと、特に文科系学生は、目を輝かせる。

4. 実験開発のポイントと改善を要する点

課題開発にあたっては、次の点に気をつけた。

- a. 単純化されすぎない、身近な現象であること。
- b. 直感的にも把握できる素材であること（五感に訴えること）
- c. 高度な装置を用いず、出来れば自宅でも実験できること

一方、改善を要する点・取り組みは

- イ) 実験の進み方に個人差が大きい（時間内に終わらない学生が出てくる）
- ロ) 学生により、音の響きの感じ方が大きく違う
- ハ) 音楽体験、基礎知識の有無

がある。しかし、後者も欠点ばかりとは言えない。(イ)は、実験の本質であるし、(ロ)は文化に多様性が生まれる原因でもある。これらの点を率直に伝えることで、むしろこれらの問題を生きた教材として活用できる。この実験で必要な音楽の知識(ハ)は、中

学までに学んだことだから、授業の冒頭で簡単な復習をすることで補える。

5. 授業の反響、アンケート結果

学生の反応を、東北大学が全学教育全般に対して行っているアンケートで調べると、以下の結果が得られている（文科系のための自然科学総合実験全体での集計，2007 年）

- とても有意義（本実験 80%，理科科目平均 39%）
- 教員がとても熱心（本実験 75%，理科科目平均 30%）
- とても満足できる内容だった（本実験 68%，理科科目平均 34%）

学生たちのレポート・感想から典型例として、手元にある一部を引用する。

【医学部 1 年生】

平均律は人工的なものではあるが、オクターブという自然の法則をもとにして作り出されている。これにも見られるように人工的なもの、つまり文化は、自然法則に基づき、しかも、それを超えて生み出されるものであるといえる。自然法則に基づき、しかもそれを超えるとき（つまり文化が生み出されるとき、あるいは技術が生み出される時ともいえると思う）は、何がよいという価値判断が働く。価値判断は誰にとっても、いつの時代にも一定なものであるわけではないので、自然法則は一定でも、多様な文化が生まれるということを今回の実験から考えることができた。

また、自然法則に基づきつつ、それを超え出るという点では、そして、そこに価値判断が伴うという点では文化も、科学も同じだと気づくことができた。

また、価値判断を伴うならば、科学の見方も一つの見方であって、絶対的なものではないということを実感できた。

（感想） 今回の実験は文系と理系の境界がとり払われるような授業で、とても興味深かったです。

【法学部 1 年生】

科学の認識について裁判官や記者までも誤っていると知り驚いた。

そして科学は答えが単純にでて、一つに決まるものだと、今まで思っていたし、そういう風に教えられてきたので今日で科学はそんな単純なものではないと思った。科学と日常の物事は意外と関連付けて考えられるのだな、と思った（科学で足りないことは政治で補おうとするなど）。

【文学部 1 年生】

f_n の式で周波数のことは科学でしっかりと説明ができることが分かった。科学で証明

できることは確かにあるようだ。しかし、先生の最初の説明であった例の問題のように、科学だけではどうにもならないこと（文化が必要な部分）もある。そこを解決するためには、やはり2つが結びつき、協力することが必要だ。

これまで自分の周りで「文系だから～」「理系だから～」といった話をする人（自分も含めて）がいた。難しい問題の解決をするためには、そういうことではなくて、双方が手を取り合っていくことが大切だと感じた。

【法学部1年生】

科学では絶対ひとつの答えを出せると思っていたが、必ずしもそうではないことが分かった。僕は音楽をやっていなかったので、自然音階と平均率の違いがあることを知ってびっくりした。

科学も法と同じく、人によっていろいろと解釈できるからおもしろい。100%正しい答えを出せないのは、高校までのイメージをくつがえすことで、おもしろいです。

【教育学部1年】

自然音階と平均律の異なる2種類の音階について

それぞれ科学的に見て浮かび上がるうなりなどの長所、短所が存在するにも関わらず、西洋音楽が平均律を選んだのは、西洋人の当時の価値判断や、文化的背景（ピアノ、チェンバロ etc.）が深く関係しているのだと気づいた。場所が違ったらまた違う方を選んだかもしれない。

科学と文化は切り離すことができない、という事実は身近な疑問から導き出すことができることを忘れずにすごしていきたい。

【サイエンス・パートナーシッププログラム (SPP) で受講した高校1～2年生の全感想】

- ・ すごく楽しく、分かりやすい講座でした。科学ができることとできないことがあるのがすごいと思いました。
- ・ とても面白くて、有意義な実験でした。
- ・ ギターを使つての実験とても楽しかったです！物理がもっと好きになりました。ご指導ありがとうございました。今まで何も知らずに楽器をさわっていたのだな…と思い、これからは科学的に見ながら楽器を使えるようになれる気がします。そして今まで先生に「音程悪っ！」といわれていたのが、ピアノで音をあわせてたからだ、と納得しました。
- ・ 科学と音楽の関係（結びつき？）について学べてよかったです。有意義な時間を過ごせました。すごくおもしろかったです！もっとカタイイメージがありました。

文系の私でも楽しく学べる実験でした。

- ・ 普遍性と多様性といった部分がとても分かりやすく楽しかったです。
- ・ とても興味深く、知識も深まり、参考になりました。ありがとうございました！
- ・ 音楽好きなので大変興味を持ってできました。おもしろかったです。
- ・ 私は音楽が大好きで、物理学にも興味があるので、とても興味深い講義でした。平均律と自然音階の2種類があるということや、音の高さと周波数の関係など、たくさんのことが分かりました。難しい部分もあったけれど、とても面白く、楽しくて、有意義な一日でした。
- ・ 楽しくて、分かりやすい授業をしていただき、ありがとうございました。
- ・ とても興味深い講義でした。内容もわかりやすく最後まで楽しく講義に参加できました。
- ・ とても楽しく、とてもためになりました。
- ・ 新たな事実を知ることができました。参加してよかったです。今回の講座は、普段の部活で経験していたことが理論的に理解できたと思います。楽しみながら実験できたのでよかったです。
- ・ とっっっっても楽しい！
- ・ ピアノにも倍音が聞こえることにびっくりしました。楽しくてわかりやすかったです。

6. 持続可能性(sustainability)：大学の科学教育にルネッサンスを

本稿では、現行の理科教育の問題点と、その認識の上に行った試みを紹介した。この試みの成否はともかく、日本社会の「科学観」を顧みれば、理科教育の根本的再検討と、それに基づく質的改善が不可欠であることは明らかだろう。そこで、現状の自然科学総合実験が抱えている困難を率直に記してみたい。これらは、先進的科学教育を行うにあたり、どこでもぶつかる、日本の大学システムの構造的問題と思われるからである。

《教材（テーマ）開発・維持の問題》

- 学内ではボランティア扱い(2004 年～)のため、テーマ責任者の教育負担（コマ数）に反映（カウント）されない。研究業績と等価に評価されない。
- サポートスタッフもいない…メンテナンス、弦の張り替えまでテーマ責任者が面倒を見る（負担軽減のため、一部は学生アルバイトに依頼）。
→ 教員からインセンティブが消失、実験の質の低下、実験の崩壊…？

《研究活動への悪影響を生じさせるシステム》

- 時間的負担が大きい（前述）.
 - 研究費申請の際，研究に割けるエフォートの合計が減少
- 一般教育に情熱を注ぐだけ不利になるシステム → 教育の質低下（必然の結果）

昨今，一般教育は教育専門職に任せればよい，との議論が少なくないようだ．しかし，このような議論は，大学教員が研究と教育を両立することによってこそ存在意義を持つという基本前提を忘れ去った根無し草の議論ではかならうか．本稿の第1章からも明らかなように，現状の理科教育が社会に生み出す問題は，教育の世界だけに閉じこもっていては見えてこない．むしろ，多様な専門性を持ち，社会とも多様な接点を持つ研究者としての「教員」だからこそ，見えてくることが多くある．そもそも，大学教員に研究が不可欠とされる理由は，それが最先端の教育に必要かつ有効だからであり，教員であることが研究の自由を正当化する基本であることを思い出すべきであろう．

大学は教育と研究が高度に両立できる，持続可能なシステムを構築せねば，健全な科学観を持つ学生を社会に送り出すこともできないだろう．現在の競争的研究環境が，先進的研究活動と先進的教育活動の両立を困難にさせるのなら，その不適切なシステム設計と運用を改善せねばなるまい．市民の乏しい科学観を他人ごとのように嘆くだけの大学人は多いが，私たちは社会の科学観を生み出す「当事者」であり，その市民の科学への理解なくしては研究も存在しえないのである．科学教育のルネッサンスは大学でも緊要の課題であり，真の実現には理念のみならず，大学の根本的制度改革も不可欠だろう．

- [1] 東北大学文科系のための自然科学総合実験テキスト編集委員会（編），『文科系のための自然科学総合実験』東北大学出版会（2008）.
- [2] 野家啓一「科学の哲学」放送大学教育振興会（2004）.
- [3] 本堂 毅「法廷の科学リテラシー」『科学技術社会論研究』小特集「科学と法の接点」（藤垣裕子編），玉川大学出版部（2009）印刷中.
- [4] 藤垣裕子（編）「科学技術社会論の技法」東京大学出版会（2005）.
- [5] J. A. ミュア・グレイ（著）斉尾 武郎（翻訳）「患者は何でも知っている：EBM 時代の医師と患者」（EBM ライブラリー）中山書店（2004）.
- [6] オグボーン（著）笠 耐 他監訳『アドバンシング物理 A2』，シュプリンガー・フェアラーク東京，2006；Ogborn, J. et al, *Advancing Physics A2*, Institute of Physics, 2001. ソロモン（著）小川正賢他訳『科学・技術・社会(STS)を考える-シスコン・イン・スクール』東洋館出版社1993；Solomon J. *THE SCIENCE IN A SOCIAL CONTEXT (How Can Be Sure?)*, Association for Science Education (U.K.), 1983.